

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 389.1

АНАЛИЗ СОВМЕСТИМОСТИ ПОДХОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

д-р техн. наук, доц. П.С. СЕРЕНКОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматривается проблема совместимости двух подходов в метрологии: классического, основанного на теории погрешностей, и современного, основанного на концепции неопределенности. Приведен анализ их соответствия теории вероятности и математической статистики. Сделан вывод о бесперспективности сведения их воедино, так как они имеют различную логику, понятия, принципы классификации источников изменчивости. Приведены алгоритмы корректного взаимного пересчета характеристик неопределенностей и погрешностей. Полученные результаты можно применять в практике деятельности испытательных аккредитованных лабораторий, выполняющих работы по заказу предприятий различных сфер деятельности: магистрального трубопроводного транспорта, гражданского и промышленного строительства, машиностроительного профиля и т.д.

Введение. Анализ точек зрения специалистов различного уровня на современные подходы к метрологии и метрологическому обеспечению производства продукции выявил ряд принципиальных разногласий и взаимных недопониманий, в частности в отношении процедур метрологического обеспечения в области магистрального трубопроводного транспорта, промышленного и гражданского строительства и т.д., а именно процедур поверки и калибровки.

Так, большинство специалистов машиностроительных предприятий по-прежнему отдают предпочтение поверке. Во-первых, потому, что в том виде, в котором калибровка в настоящее время определена в отечественном законодательстве, она является достаточно затратным мероприятием. Во-вторых, калибровка вызывает определенные методические трудности для персонала метрологических служб, привыкшего оперировать характеристиками погрешностей, строгими алгоритмами их идентификации, комплексирования и представления результатов. Оценивание неопределенности результата измерения предполагает большую «творческую» свободу в выборе и обосновании методики обработки результатов измерений, но одновременно повышает и степень ответственности метролога за свой выбор.

Таким образом, наряду с организационно-техническими моментами разногласия касаются методов оценки точности результата измерения. Как известно, теоретической базой поверки является теория погрешностей, калибровки – концепция неопределенности результатов измерения. Целью данной работы выступают анализ выявленных противоречий и разработка путей их преодоления.

Основная часть. Для более четкого представления рассматриваемого вопроса целесообразно провести сравнение концепции неопределенности и теории погрешности результатов измерений. Концепция неопределенности строго придерживается фундаментальных положений теории вероятности и математической статистики, что в современных условиях повышенного внимания к степени доверия результатов измерений (испытаний) является ее значительным преимуществом.

Руководство по выражению неопределенности измерения [1] исходит из того, что все без исключения величины, вовлеченные в процесс измерения, в том числе и результат измерения, априори являются случайными по своей природе. Соответственно, результат измерения величины Y может быть представлен как диапазон значений, которые могут быть с достаточным основанием приписаны этой величине:

$$Y = Y^0 \pm U, P.$$

Здесь Y^0 – оценка результата измерения (математическое ожидание) – *неслучайная величина*, представляющая собой комбинацию всех вовлеченных в процесс измерения оценок величин x_i ; $U = k \cdot u_c(Y)$ – расширенная неопределенность результата измерения A^0 с вероятностью охвата p – *случайная величина*, является комбинацией всех вовлеченных в процесс измерения оценок дисперсий $u^2(x_i)$ величин x_i , где k – коэффициент охвата, значение которого выбирается на основе уровня доверия. Обычно k назначают в диапазоне от 2 до 3 (для уровня доверия $p = 0,95 \dots 0,9973$); $u_c(Y)$ – суммарная стандартная неопределенность оценки результата измерения Y , представленная стандартным отклонением результата измерения, характеризующим разброс его значений.

Суммарная стандартная неопределенность оценки результата измерения Y

$$u_c(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)},$$

где f – функция, характеризуется как модель измерений; $u^2(x_i)$ – дисперсия или ковариация влияющего параметра x_i , $i = 1 \dots N$; $u(x_i)$ – стандартная неопределенность влияющего параметра x_i , оцененная по типу A или B .

Заметим, что понятие «уровень доверия p », введенное в [1; 2], на наш взгляд, не является семантически корректным. В такой форме p ассоциируется с вероятностью «абсолютного» доверия к результату измерения или с его достоверностью. Тем не менее установлено, что достоверность результата измерения, выражаемая через уровень доверия, определяется не только собственно процессом измерения, но и его организационно-техническим сопровождением [3]. В этом смысле более корректным является понятие «классической» метрологии – «доверительная вероятность P ».

Теория погрешностей результатов измерений, в отличие от концепции неопределенности, является сложившейся областью знаний, сформированной в особых экономических, политических, организационно-технических условиях и нашедшая отражение в комплексе нормативных документов различных уровней. Нормативные документы, имеющие в свое время статус обязательных к исполнению, предопределили специфику классической метрологии как весьма консервативной предметной области.

Если не акцентировать внимание на различиях в исходных понятиях (для метрологии это «истинное значение» и «погрешность», а для неопределенности это «неопределенность» и «неопределенность измерения»), ключевыми отличиями теории погрешностей являются следующие:

- рассматриваются две категории величин, вовлеченных в процесс измерения, – систематические и случайные;

- в отличие от концепции неопределенности, теория погрешностей оперирует не измеряемыми величинами, а погрешностями, которые представляют собой особую форму приведения измеренной величины к идеальной $\Delta = X_{изм} - Q$ или в современной трактовке – форму приведения измеренной величины к опорному значению $\Delta = X_{изм} - X_{ref}$ [4];

- погрешность как оцениваемая величина представляет собой комбинацию систематической и случайной составляющих $\Delta = \Delta_c + \overset{\circ}{\Delta}$, каждая из которых является в общем случае результатом комплексирования элементарных составляющих [4].

В этом смысле теория погрешностей не строго придерживается фундаментальных положений теории вероятности, и эта некорректность решается в классической метрологии раздельным выявлением и комплексированием систематических и случайных составляющих погрешности, что, очевидно, ограничивает ее возможности в части математического моделирования и анализа результатов измерения в нетривиальных случаях, как показано ниже.

Метрическая конвенция заложила основы международной системы измерений, обеспечивающей надежность, прослеживаемость и эквивалентность результатов измерений. Консультативные комитеты Международного комитета мер и весов определили новые постоянно возрастающие потребности в достоверных и сопоставимых результатах измерений в таких областях, как мониторинг окружающей среды, производство продуктов питания, торговля и др. [5].

Заявленная в [1; 5] «несостоятельность теории погрешностей» при оценивании точности, надежности и прослеживаемости результатов измерений в перечисленных выше областях обусловлена, по нашему мнению, следующими соображениями.

Теория погрешностей применима для таких достаточно «консервативных» видов измерений, как, например, линейно-угловые, для которых составляющие общей погрешности результата исчерпывающе определены практикой, процедура измерений отработана и во многих случаях стандартизована. Здесь обоснованно применим прагматичный подход к представлению процесса измерения как «черного ящика», в отношении которого можно с достаточной степенью корректности использовать апробированную классическую модель измерения.

Теория погрешностей не является состоятельной для современных, инновационно развивающихся областей деятельности, для которых имеет место тенденция технического и технологического усложнения процедур контроля и испытаний продукции. Последнее связано с высокой степенью риска как в отношении результатов контроля и испытаний, так и в отношении самой продукции.

Например, для медицины, фармацевтической, пищевой и других видов промышленности, продукция которых имеет повышенный уровень риска, при оценке результатов контроля и испытаний, очевидно, следует придерживаться большей строгости в построении модели измерения, так как даже относительно небольшая часть «неучтенной» неопределенности может повлечь за собой значительные негативные последствия, связанные с жизнью и здоровьем людей.

Проведение измерений, являющихся частью контроля и испытаний продукции в такого рода областях, предполагает установление различных уровней приближений и допущений, тщательный анализ факторов изменчивости, а значит, рассматривает измерение как процесс преобразования информации с разложением его на переходы. Поэтому для оценки точности результата измерения не всегда представляется возможным использовать «классическую» теорию погрешностей, так как необходимо особым образом учитывать эффекты и физические принципы, свойственные конкретной области [6]. Например, помимо факторов, относящихся непосредственно к измерительным процедурам, все большую роль в обеспечении заданного уровня точности и достоверности результатов контроля и испытаний начинают играть такие составляющие, как:

- «факторы действия», связанные с контактами оператора с объектом, техническими средствами, средой (наполнение пробирок реагентами, установка образцов на испытательное оборудование, нагрев, охлаждение и другие виды воздействия на образцы в процессе контроля и испытаний, манипулирование техническими средствами и т.д.), которые не всегда возможно включить в модель измерения как поправки и поправочные коэффициенты, их влияние является опосредованным;

- «факторы субъективного оценивания», связанные с выполнением определенных действий на различных стадиях процесса контроля и испытаний на основе органолептических восприятий, например, «на просвет», по цвету, звуку, запаху и т.п. (хотя для этих целей используются модели «стандартных наблюдателей», но, как показывает практика, они вносят свой вклад в изменчивость процесса).

Представим две измерительные ситуации, требующие применения количественных характеристик двух описываемых подходов. Предпринимаемые в некоторых работах и нормативных документах попытки подробного сравнительного анализа теории погрешностей и концепции неопределенностей часто не являются удачными (подобно тому, как осуществлять перевод текста с немецкого языка на русский через английский) [7; 8]. Данные подходы, несмотря на то, что их математические аппараты схожи и базируются на теории вероятности и математической статистике, представляют собой две параллельно существующие концепции. Их бессмысленно сводить воедино, так как они имеют различную логику, понятия и принципы классификации источников изменчивости.

Все ситуации, требующие взаимного пересчета погрешностей и неопределенностей, можно разделить на два класса:

- 1) полный взаимный пересчет характеристик погрешностей в характеристики неопределенностей;
- 2) использование в расчетах смешанных характеристик:
 - при расчете суммарной погрешности измерения – отдельных характеристик неопределенности;
 - при расчете расширенной неопределенности измерения – отдельных характеристик погрешности.

Произведем перерасчет характеристик неопределенностей в характеристики погрешностей. Имеется парк средств измерений, прошедших процедуру калибровки, то есть имеются протоколы калибровки и расчет неопределенности результатов измерений. Требуется в рамках комплекса работ по метрологическому обеспечению производства разработать методику выбора средств измерения, например, для операционного контроля параметров изделия в процессе его производства, руководствуясь РД 50-98-86 [9]. Данный документ предполагает выбор средств измерений и методик выполнения измерений исходя из характеристик погрешностей.

Исходные данные перерасчета взяты из протоколов калибровки имеющихся средств измерения (бюджетов неопределенностей), предполагаемых для альтернативного выбора, известны: расширенная неопределенность U , коэффициент охвата k , уровень доверия p . Дополнительно к перечисленным, для расчета всех оценок характеристик погрешностей необходимо иметь количество результатов наблюдений n , эффективное число степеней свободы ν_{eff} . Алгоритм пересчета характеристик неопределенности в характеристики погрешности результата измерений представим в следующем виде:

- оценка среднего квадратического отклонения (СКО), характеризующего суммарную погрешность результата измерений

$$S_{\Sigma} = \frac{U}{k} = u_c;$$

- оценка СКО случайной погрешности результата измерений

$$S_{\Sigma} = u_A = S_{\Sigma A} \sqrt{\frac{n-1}{\nu_{eff}}};$$

- оценка СКО, характеризующая неисключённую систематическую погрешность (НСП) результата измерений

$$S_{\theta} = u_B = \sqrt{S_{\Sigma}^2 - S^2};$$

- оценка доверительных границ НСП результата измерений

$$\theta(P) = K_p \sqrt{3} S_\theta,$$

где коэффициент $K_p = 1,1$ для $P = 0,95$; $K_p = 1,4$ для $P = 0,99$ и $m > 4$;

- оценка доверительных границ погрешности результата измерений

$$\Delta = \frac{t_p(n-1) \cdot S + \theta(P)}{S + S_\theta} \cdot S_\Sigma,$$

где $t_p(n-1)$ – коэффициент Стьюдента для заданной вероятности P и эффективного числа степеней свободы $n-1$.

Далее, руководствуясь значением Δ , по РД 50-98-86 можно оценить возможность применения выбранного средства измерения для операционного контроля параметра изделия, представленного полем допуска. Следует обратить внимание на тот факт, что перевод характеристик неопределенности в характеристики погрешности измерения достаточно громоздок в силу консервативности алгоритма получения доверительных границ погрешности результата измерения, в частности коэффициента расширения k :

$$k = \frac{t_p(n-1) \cdot S + \theta(P)}{S + S_\theta}.$$

Сложная конструкция коэффициента предполагает идентификацию определение практически всех элементов погрешности измерения.

Произведем перерасчет характеристик погрешностей в характеристики неопределенностей. Имеется парк средств измерений, регулярно проходящих процедуру поверки, то есть имеются протоколы поверки, свидетельства поверки, включающие информацию о погрешности поверенных средств измерений. В рамках комплекса работ по метрологическому обеспечению испытаний продукции планируется применение средств измерений, имеющих свидетельство поверки. В соответствии с требованиями СТБ ИСО/МЭК 17025 оценка результатов испытаний должна быть представлена как неопределенность, что предполагает составление бюджета неопределенности.

Требуется в рамках комплекса работ по метрологическому обеспечению испытаний продукции по конкретному параметру разработать методику обработки и представления результата испытаний. Расширенная неопределенность результата испытаний включает, в том числе, вклад неопределенности средства измерения, имеющего действующий аттестат поверки и приведенные в нем характеристики погрешности.

Исходные данные примера второго перерасчета взяты из протоколов поверки средства измерения, выбранного для использования в испытаниях продукции, известны: оценка СКО S результата измерения; оценка НСП в виде границ $\theta(P)$ для заданной доверительной вероятности P ; число составляющих НСП – m ; количество результатов наблюдений, взятых для вычисления среднего арифметического в качестве оценки результата измерения, равняется n .

Алгоритм пересчета характеристик погрешности в характеристики неопределенности результата измерений представлен в следующем виде:

- оценка стандартной неопределенности результата измерения по типу A :

$$u_A = S;$$

- оценка стандартной неопределенности результата измерения по типу B

$$u_B = \frac{\theta(p)}{K(p)\sqrt{3}},$$

где коэффициент $K(p) = 1,1$ для $P = 0,95$; $K(p) = 1,4$ для $p = 0,99$ и $m > 4$;

- оценка суммарной неопределенности результата измерения

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2};$$

- оценка эффективного числа степеней свободы

$$v_{eff} = (n-1) \cdot \left(1 + \frac{u_B^2}{u_A^2}\right)^2;$$

- оценка коэффициента охвата k как коэффициента Стьюдента $t_p(v_{eff})$ для заданного уровня доверия p и полученной оценки эффективных степеней свободы v_{eff} ;
- оценка расширенной неопределенности $U = k \cdot u_c$.

Далее значения характеристик u_c, v_{eff}, k, U выбранного средства измерения можно использовать как составляющий элемент бюджета неопределенности результата испытания, в котором это средство предполагается задействовать.

Заключение. Не следует смешивать организационно-технические и научно-методические аспекты современной метрологии. Организационно-технические аспекты метрологического обеспечения производства регламентирует Закон Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений», который следует неукоснительно выполнять. Однако, что касается научно-методических аспектов, например, в части выбора и обоснования методов, методик, техник сбора, обработки и анализа данных измерительного эксперимента, а также представления результатов измерений, то современные подходы и требования к метрологии и метрологическому обеспечению предполагают здесь значительно большую «творческую» свободу. А это, в свою очередь, предполагает, что научно-методический уровень работников метрологических служб должен соответствовать уровню риска принимаемых решений.

Теория погрешностей и концепция неопределенности – два принципиально не противоречащих друг другу подхода, которые являются востребованными для решения различных задач метрологического обеспечения и метрологического контроля. Их бессмысленно сводить воедино, так как они имеют различную логику, понятия, принципы классификации источников изменчивости. Однако их методологическая основа – теория вероятности и математическая статистика – позволяет корректно и достаточно просто производить взаимный пересчет характеристик неопределенностей и погрешностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement. – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
2. Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины. Руководство 99. Третья редакция, 2009.
3. Серенков П.С. Развитие доказательной базы метрологии на основе принципов системного подхода / П.С. Серенков // Метрология и приборостроение. – Минск, 2009. – № 1. – С. 8–11.
4. Артемьев, Б.Г. Справочное пособие для работников метрологических служб: в 2-х кн. / Б.Г. Артемьев, С.М. Голубев; предисл. канд. техн. наук И.Х. Сологыня. – 3е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – Кн. 1. – 438 с.
5. Отчеты консультативных комитетов Международного комитета мер и весов: док. 23-й Генеральной конф. мер и весов. – Минск: Белорус. гос. ин-т метрологии, 2003. – 93 с.
6. Серенков, П.С. Применение методов непараметрического оценивания неопределенностей в задачах метрологического обеспечения / П.С. Серенков, В.М. Романчак // Метрология-2009: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2009 г. / Госстандарт Респ. Беларусь, Белорус. гос. ин-т метрологии, Белорус. нац. техн. ун-т; под общ. ред. В.Н. Корешкова [и др.]. – Минск, 2009. – С. 141–145.
7. Захаров, И.П. Теория неопределенности в измерениях: учеб. пособие / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Харьков: Консум, 2002. – 256 с.
8. Государственная система обеспечения единства измерений: РМГ 43-2001. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». – Минск: Изд-во стандартов, 2002. – 20 с.
9. Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм: РД 50-98-86.

Поступила 09.06.2015

THE ANALYSIS OF THE COMPATIBILITY OF APPROACHES TO ESTIMATION OF MEASUREMENT RESULTS

P. SERENKOV

The problem of compatibility of the two approaches in metrology: classic, based on the errors theory, and modern, based on the uncertainty concept, is investigated. The analysis of their compliance with the probability theory and mathematical statistics is presented. The conclusion about the futility of their consolidation, as they have a different logic, concepts, principles, classification of sources of variability, is justified. Algorithms correct mutual conversion characteristics of uncertainties and errors are offered. The given results can be applied in work practice of test accredited laboratories which fulfill contracts with many companies of different industrial areas: main pipeline transport, civil and industrial building, machine-building sphere etc.